

Analisa Perpindahan Panas Konveksi Aliran di Atas Permukaan Berkas Pipa: Sebuah Kajian Literatur

Indra M. Gandidi¹⁾

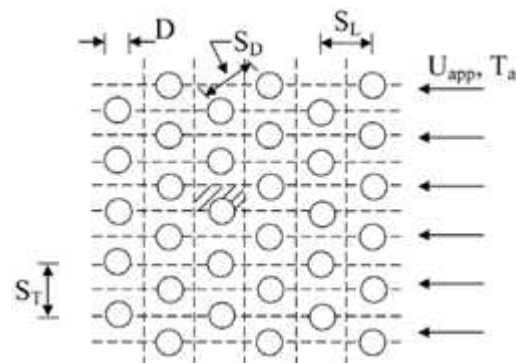
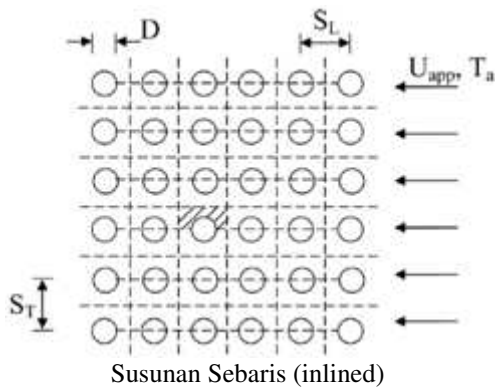
¹⁾ Department of Mechanical Engineering, University of Lampung
Jalan. Prof. S. Brodjonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145, INDONESIA
Phone: +62 721 3555519, Fax: +62 721 734947
E-mail: indra_m_g@unila.ac.id

Abstract

Heat transfer in flow across bank of tubes is of particular importance in the design of heat exchangers. Heat exchangers are found in numerous industrial applications, such as steam generation in a boiler or air cooling in the coil of an air conditioner. The Zakauskas's correlation from the experimental data is more popular method that used to design of cross flow of heat exchanger. However, due to optimization process and more efficiency, several empirical equations were generated through the analytical and CFD methods. Hence, this paper was intended to perform a comprehensive study to analyze the heat transfer calculation of cross flow heat exchanger by using several methods in which it has been reported. Among of four methods are analyzed, the analytic method, normalization equations from CFD and Grimson's correlation have good agreement to used for design of cross flow heat exchanger with the compact and non-compact configuration, while correlation of Zakauskas is only suitable for non-compact configuration.

PENDAHULUAN

Perhitungan perpindahan panas fluida yang mengalir melintasi permukaan berkas pipa merupakan suatu hal yang penting dalam perancangan penukar kalor yang banyak ditemukan dalam berbagai aplikasi industri, seperti boiler, cooler, dan condenser. Peralatan yang tersusun dari sekumpulan berkas pipa ditujukan untuk memindahkan panas dalam jumlah yang besar dari fluida yang mengalir dalam berkas pipa ke fluida yang mengalir di atas permukaan berkas pipa dengan kecepatan aliran U_{app} [1]. Berkas pipa biasanya disusun secara inline (sebaris) dan staggered (selang seling) dengan geometri berkas pipa dicirikan dengan transverse pitch (S_T), longitudinal pitch (S_L) dan diagonal pitch (S_D).



Konfigurasi berkas pipa akan menghasilkan aliran lebih turbulensi di atas permukaan pipa sehingga meningkatkan laju perpindahan panas antara fluida panas dan fluida dingin [2]. Ada berbagai persamaan korelasi dan empiris yang telah dilaporkan oleh berbagai peneliti dan telah dilampirkan dalam berbagai literature dan textbook. Oleh karena itu, paper ini melakukan studi literatur terhadap berbagai persamaan yang digunakan untuk menganalisa perpindahan panas aliran di atas permukaan berkas pipa dan membandingkan antara hasil yang didapatkan untuk berbagai persamaan tersebut. Diakhir paper ini akan diberikan beberapa kesimpulan dan sebuah rekomendasi untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dalam menganalisa laju perpindahan panas aliran di atas permukaan berkas pipa.

KALKULASI DAN ANALISIS PERPINDAHAN PANAS

Laju perpindahan panas konveksi yang berlangsung di atas permukaan berkas pipa antara fluida panas dan fluida dingin dapat dihitung menggunakan berbagai persamaan korelasi atau empiris yang dapat ditemukan dalam berbagai literature. Misalnya persamaan yang dilaporkan oleh Colburn, Hoge, Pierson, Omohundro, Bergelin, Jones, Gram, Zukauskas, Aiba, Zukauskas-Ulinskas, dan Grimison. Semua persamaan empiris ini melibatkan berbagai variabel seperti panjang pitch, sifat-sifat dan karakteristik aliran fluida, jumlah baris dan jumlah kolom pipa, serta geometri pipa [3]. Misalnya persamaan yang dilaporkan Grimison [3]:

$$Nu_D = C Re_{max}^m \quad (1)$$

Dimana, persamaan ini berlaku pada $N \geq 10$, $Pr = 0.7$, $2000 < Re < 0.4 \times 10^5$ dengan Re_{max} merupakan fungsi kecepatan maksimal dalam berkas pipa, yaitu:

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} U_{app} \quad (\text{sebaris}) \quad (2)$$

$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} U_{app} \quad (\text{selang seling}) \quad (3)$$

Atau persamaan Zukauskas [3]:

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (4)$$

Dimana $N \geq 20$, $0.7 < Pr < 500$, $10^3 < Re < 2 \times 10^5$, $S_T/S_L < 2$ (staggered), $S_T/S_L < 0.7$ (inlined) dimana Re merupakan fungsi dari kecepatan aliran masuk berkas pipa (U_{app})

Akan tetapi, kalkulasi perpindahan panas menggunakan persamaan empiris yang tersedia dalam literature hanya berlaku untuk kondisi tertentu. Persamaan ini tidak bisa digunakan diluar kisaran nilai yang ditetapkan. Persamaan empiris akan menyebabkan perkiraan yang tidak realistis, diskontinuitas dan berbagai kesulitan dalam proses numerik jika digunakan diluar kondisi yang diberikan.

Untuk alasan ini, W.A. Khan., et all, 2006, melakukan pendekatan analitik untuk menghitung laju perpindahan panas pada berkas pipa yang dapat digunakan pada kisaran nilai yang lebih luas [4]. Proses analitik dilakukan dengan pendekatan metode integral pada lapis batas pada salah satu baris pipa dengan asumsi *steady state*, laminar dan berkembang penuh. Analitik dilakukan untuk dua jenis konfigurasi pipa yaitu susunan pipa sebaris dan selang seling dengan $S_T \times S_L \leq 1.25 \times 1.25$ (konfigurasi *compact*) dan $S_T \times S_L \geq 2 \times 2$ (konfigurasi *non-compact*) pada $S_T/D = S_L/D = 1.25$ dan $S_T/D = S_L/D = 2$ dimana nilai ini disesuaikan

dengan kondisi yang dilakukan oleh Zukauskas. Hasil analitik yang diperoleh adalah nilai koefisien perpindahan panas konveksi aliran di atas permukaan berkas pipa *compact* sebesar $234 \text{ W/m}^2\text{K}$ dan $136.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ untuk *non-compact*. Hasil berkas pipa *compact* lebih tinggi 22% dari pada hasil yang dilaporkan oleh Zukauskas dan nilai bersesuaian untuk susunan berkas pipa *non-compact*.

Perbedaan hasil pada konfigurasi *compact* disebabkan oleh penggunaan variabel aliran dalam perhitungan. Zukauskas menggunakan kecepatan aliran masuk berkas pipa (U_{app}) sementara Khan menggunakan kecepatan aliran pada area minimum dekat berkas pipa (U_{max}) dimana karakteristik aliran di area minimum lebih turbulen dari pada aliran masuk berkas pipa. Hal ini mengindikasikan bahwa susunan pipa dengan rasio $S_T/D = S_L/D = 3$ hampir tidak ada perbedaan bilangan Nusselt yang dihasilkan antara susunan pipa sebaris dan selang seling. Hasil kontras terlihat pada rasio yang lebih rapat $S_T/D = S_L/D = 1.25$ dimana susunan selang seling memberikan nilai perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan susunan sebaris. Hal ini terlihat bahwa hasil yang diperoleh oleh Khan sangat cocok dengan hasil menggunakan persamaan korelasi yang dilaporkan oleh Grimison [3] karena kedua persamaan ini sama-sama menggunakan kecepatan maksimum V_{max} yang merupakan fungsi dari panjang jarak longitudinal dan transversal. Perbedaan antara kedua persamaan ini hanya pada metode untuk mendapatkan persamaan bilangan Nusselt. Grimison menggunakan data hasil pengujian untuk mendapatkan sebuah persamaan korelasi sementara Khan menggunakan metode integral untuk mendapatkan nilai bilangan Nusselt.

Bagaimanapun, diantara metode yang diberikan oleh Grimison dan Khan, persamaan korelasi Grimison terlihat lebih sederhana dibandingkan metode Khan. Perhitungan dengan metode analitik yang dilaporkan Khan terlihat lebih rumit dengan melibatkan perhitungan integral yang sangat kompleks. Walau begitu, hasil yang dilaporkan oleh Khan lebih baik dibandingkan persamaan korelasi Zakauskas karena perhitungan analitik yang diberikan oleh Khan telah melibatkan berbagai parameter dalam kisaran yang luas.

Akan tetapi, persamaan korelasi yang dilaporkan oleh Grimison dan Zakauskas hanya berlaku untuk kondisi aliran dengan bilangan Reynold lebih kecil dari bilangan Reynold kritis ($Re_c < 5 \times 10^5$) atau aliran laminar. Dan persamaan analitik yang dilaporkan oleh W.A. Khan yang diterapkan pada salah satu baris dalam berkas pipa hanya berlaku dengan kondisi aliran *steady state*, laminar dan berkembang penuh. Juga, hasil yang didapat melalui metode analitik tidak diverifikasi secara eksperimental sehingga kepastian hasil analisis ini sulit diterima sepenuhnya terutama untuk bilangan Reynold yang lebih besar dari 5×10^5 . Lebih lanjut, ketiga persamaan ini tidak

memperhitungkan fenomena ketidakseragaman aliran dalam berkas pipa dan aliran yang membentur permukaan pipa akan menghasilkan karakteristik aliran berpusar atau membangkitkan aliran *secondary flow* disekitar permukaan pipa akibat konfigurasi berkas pipa. Dimana diketahui, *secondary flow* akan memberikan kontribusi besar terhadap laju perpindahan panas di permukaan berkas pipa.

Baru-baru ini, Taewan Kim, 2013, mencoba membuktikan efek konfigurasi berkas pipa terhadap laju perpindahan pada aliran di atas permukaan pipa menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan pendekatan model *two-equation turbulence* yaitu model κ - ϵ dan model SST κ - ω [5]. Proses simulasi dibatasi pada konfigurasi susunan berkas pipa sebaris (*inline*) dengan bilangan Reynold 8.315×10^4 dan 3.627×10^5 dengan kecepatan maksimal V_{max} serta nilai rasio transverse pitch S_T/D dijaga konstan pada 1.4 dan rasio longitudinal pitch S_L/D divariasikan dari 1.1-3.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai bilangan Nuselt meningkat dengan meningkatnya nilai rasio longitudinal pitch untuk kedua bilangan Reynold yang disimulasikan. Untuk kisaran nilai rasio longitudinal pitch S_L/D dari 1.1 – 3, semua nilai bilangan Nuselt lebih kecil dari bilangan Nuselt yang didapat menggunakan persamaan korelasi Zakauskas. Penyimpangan terbesar terjadi pada rasio longitudinal pitch yang lebih kecil yaitu sebesar 37.1% dan penyimpangan ini akan terus berkurang dengan meningkatnya rasio longitudinal pitch dan mencapai puncak pada rasio longitudinal 2.7 dengan simpangan nilai sebesar 2.2% untuk bilangan Reynold 8.315×10^4 dan 0.6% untuk bilangan Reynold 3.627×10^5 . Berdasarkan hasil simulasi, penyimpangan ini disebabkan oleh aliran dari inlet melewati berkas pipa membentuk *secondary flow* pada bagian depan dan belakang pipa. Karena kecepatan aliran sekunder lebih rendah dibandingkan dengan arus utama atau bahkan stagnasi pada ujung depan dan belakang pipa, fluida *secondary flow* tidak dapat memberikan kontribusi perpindahan panas sebesar fluida utama. Efek stagnasi akan berkurang dengan meningkatnya bilangan Reynold dan akan memperkecil penyimpangan nilai bilangan Nuselt antara hasil simulasi dan Zakauskas. Diantara dua model turbulen yang digunakan, model SST κ - ω lebih layak digunakan untuk kondisi yang dispesifikasikan dan untuk mendapatkan hubungan umum dari bilangan Nuselt yang dihasilkan oleh kedua model, bilangan Nuselt hasil simulasi dinormalisasi dengan bilangan Nuselt hasil perhitungan dengan persamaan Zakauskas, dan didapat:

$$\frac{Nu_n}{Nu_{Zuk}} = 1.0 - 2.260 \exp(-1.675 L_L) \quad (5)$$

Persamaan normalisasi yang didapat telah

diverifikasi dengan data eksperimental yang dihasilkan oleh Zhang, Y., et al, 1992 dengan $S_T/D = 3$ dan $S_L/D = 1.1$ dengan bilangan Reynold antara 2500-12000. Validitas data verifikasi menunjukkan kesesuaian yang tinggi dengan data yang dilaporkan Zhang dan ada penyimpangan hasil sebesar 40% jika dibandingkan data yang dihasilkan menggunakan persamaan Zakauskas. Verifikasi persamaan normalisasi juga dilakukan terhadap data yang dihasilkan oleh Pierson, O.L, 1937 dengan $S_T/D = 3$ dan S_L/D divariasikan dari 1.25-3.0 dengan bilangan Reynold antara 5000-30000 [7]. Ada hasil yang menarik yang didapat pada kisaran Reynold 5000-30000 dimana pada $S_T/D = 3$ dan $S_L/D = 1.25$ -2.0, hasil bilangan Nuselt persamaan normalisasi dan Pierson sangat bersesuaian dengan baik dan menyimpang cukup signifikan dari dihasilkan persamaan Zakauskas. Tapi pada $S_T/D = 3$ dan $S_L/D = 3$ hasil yang sangat bersesuaian adalah antara persamaan normalisasi dan Zakauskas dan sedikit menyimpang dengan hasil yang dilaporkan Pierson. Perbedaan ini menunjukkan efek dari rasio pitch tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap karakteristik aliran dengan kata lain aliran dalam berkas pipa mempunyai kecepatan yang sama dengan aliran utama U_{app} yang masuk ke dalam berkas pipa sebagaimana yang digunakan dalam perhitungan bilangan Nuselt menggunakan persamaan Zakauskas.

Hasil yang diberikan oleh Taewan Kim, sungguh sebuah hasil yang sangat baik dan sederhana untuk merancang sebuah penukar kalor berkas pipa susunan sebaris yang paling optimal terutama pada rasio S_L/D yang lebih besar. Hal ini terlihat bahwa pada rasio $S_T/D = 3$ dan $S_L/D = 3$ hasil yang didapat sangat bersesuaian antara data persamaan normalisasi, data yang dilaporkan Pierson dan hasil menggunakan persamaan Zakauskas. Akan tetapi, persamaan normalisasi ini tidak mewakili sebagian besar alat penukar kalor yang ada di industri karena alat penukar kalor di industri mempunyai susunan pipa selang seling (*staggered*). Efek aliran turbulen dan *secondary flow* lebih dipengaruhi oleh susunan pipa selang seling sehingga perlu dilakukan simulasi untuk susunan selang seling dan membandingkannya dengan beberapa hasil yang didapat menggunakan berbagai persamaan korelasi.

KESIMPULAN

Nilai bilangan Nuselt untuk sebuah penukar kalor dapat mewakili besarnya laju perpindahan panas yang ditransfer dari fluida panas ke fluida dingin yang mengalir di dalam dan di atas permukaan berkas pipa. Dari empat persamaan empiris yang dibandingkan, hasil yang didapat menggunakan persamaan Grimson lebih bersesuaian dengan hasil yang didapat melalui persamaan analitik dan persamaan normalisasi. Ada penyimpangan yang berarti jika ketiga metode ini

dibandingkan dengan persamaan Zakauskas. Ketiga persamaan ini dapat digunakan untuk merancang sebuah penukar kalor berkas pipa dengan konfigurasi *compact* dan *non-compact*. Sedangkan persamaan korelasi Zakauskas lebih cocok digunakan untuk merancang penukar kalor berkas pipa dengan konfigurasi *non-compact*.

Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, sebaiknya metode analitik perlu diuji untuk bilangan Reynold di atas 5×10^5 untuk melihat efek konfigurasi pipa dan untuk persamaan normalisasi perlu diuji untuk susunan berkas selang seling.

Dari keempat persamaan empiris yang dilaporkan, belum ada yang mengkaji efek rasio *diagonal pitch* S_D/D terhadap laju perpindahan panas aliran di atas permukaan berkas pipa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yunus A. Cengel, 2003, "Heat Transfer: A Practical Approach", McGraw Hill Higher Education, International Edition, Singapore
- [2] G. F. Hewitt., et all, 1994, "Process Heat Transfer", CRC Press, International Standard Book, USA
- [3] Incropera P. F., et all, 1990, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, Inc, Singapore
- [4] W.A. Khan ., et all, 2006, "Convection heat transfer from tube banks in cross flow: Analytical approach", International Journal of Heat and Mass Transfer, V. 49, P. 4831–4838
- [5] Taewan Kim, 2013, Effect of longitudinal pitch on convective heat transfer in crossflow over in-line tube banks", Annals of Nuclear

- Energy, V. 57, P. 209–215
- [6] Zhang, Y., et all, 1992, "The effect of a gap between layers on the heat transfer performance of aligned tube banks", Heat Transfer Eng. V. 13, P. 33–41
- [7] Pierson, O.L, 1937, "Experimental investigation of the influence of tube arrangement on convective heat transfer and flow resistance in cross flow of gases over tube banks", Trans. ASME, V. 59, P. 563–572

DAFTAR SIMBOL

C	Faktor koreksi
D	Diameter hidraulik
L	rasio S_L/D
Nu_D	Bilangan Nuselt pada diameter hidraulik
Nu_n	Bilangan Nuselt hasil normalisasi
Nu_{zuk}	Bilangan Nuselt Zakauskas
Pr	Bilangan Prandelt
Re_D	Bilangan Reynold pada diameter hidraulik
Re_{max}	Bilangan Reynold pada kecepatan maksimum
S	Panjang pitch
U_{app}	Kecepatan fluida masuk berkas pipa
V_{max}	Kecepatan maksimum

Subscript

D	Diagonal
L	Longitudinal
m	Pangkat exponen
T	Transversal